

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПИРОМЕТРОВ

Пономарев Д.Б.

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Рассмотрена необходимость уменьшения погрешности бесконтактных измерений температуры поверхности металлов. Рассмотрен способ уменьшения методической погрешности пирометра спектрального отношения связанный с переменным коэффициентом черноты металлов, заключающийся в реализации пирометра данного типа на основе одного фотодиода. Работа одного фотодиода в двух спектральных диапазонах обеспечивается благодаря изменению спектральной чувствительности фотодиодов при переходе от фотодиодного режима работы к фотогоальваническому в режиме короткого замыкания. Приведены спектральные характеристики чувствительности фотодиода, показывающие принадлежность полученного двухспектрального фотоприемника к классу мозаичный фотоприемников. Приведены расчетные зависимости коэффициента увеличения погрешности пирометра спектрального отношения от температуры на основе кремниевого фотодиода ФД-256 при обратном напряжении 10 и 100 В. Приведена сравнительная оценка методической погрешности предложенного способа.

Ключевые слова: фотодиод, погрешность, пирометр спектрального отношения, спектральная чувствительность, уравнение Планка.

The necessity to reduce the error contactless temperature measurement of metal surfaces. The way of reducing the systematic error spectral ratio pyrometer associated with variable emissivity of metals is to implement this type of pyrometer on the basis of a single photodiode. The work of one of the photodiode in two spectral ranges provided by changing the spectral sensitivity of the photodiodes in the transition from the photodiode to the photovoltaic mode in short circuit mode. The spectral sensitivity characteristics of the photodiode, showing affiliation obtained two-spektral photodetector to the class of a mosaic of photodetectors. Calculated according to the magnification error spectral ratio pyrometer temperature based on a silicon photodiode PD-256 with a reverse voltage of 10 and 100 V. A comparative assessment of the methodological error of the proposed method.

Keywords: photodiode, error, pyrometer spectral ratio, spectral sensitivity, Planck equation.

В металлургическом производстве одним из основных параметров, определяющих технико-экономические параметры функционирования как каждого агрегата, так и комбината в целом, является температурный режим получения готовой продукции. Конкурентоспособность металлургических предприятий в значительной мере определяется качеством метрологического обеспечения технологических процессов и в первую очередь точностью контроля тепловых процессов. Для контроля температур на прокатных станах, в печах наиболее широко применяются пирометры различных типов: полного, частичного излучения и пирометров спектрального отношения (ПСО).

Большинство современных пирометров имеют малую инструментальную погрешность, хорошее быстродействие и малый показатель визирования. Однако при их использовании часто не учитываются методические

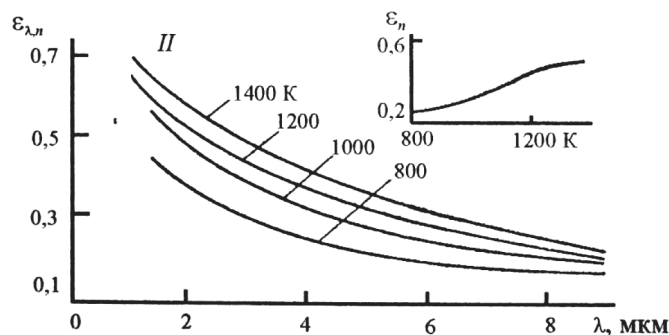


Рис. 1. Радиационные характеристики холоднокатаной низкоуглеродистой стали в восстановительной среде [1]

погрешности данного метода контроля, связанные в первую очередь с переменным коэффициентом черноты (спектральным и интегральным) объекта измерения (рис. 1), зависящей от уровня температуры, химического состава металла, состояния его поверхности, угла визирования, спектрального диапазона пропускания оптической системы пирометра [1]. Поэтому совершенствование систем бесконтактного измерения температуры происходит как за счет улучшения инструментальных характеристик, так и уменьшения влияния коэффициента черноты на точность контроля.

В высокотемпературных измерениях достоверное определение истинной температуры пирометрами частичного излучения возможно при коррекции показаний с учетом знания действительного коэффициента черноты металла. В ПСО в основу работы положена зависимость отношения интенсивностей лучистых потоков для двух или нескольких спектральных интервалов. Это позволяет уменьшить ряд неопределенностей, сопровождающих процесс пирометрических измерений: зависимость показаний от зоны обзора пирометра, изменений коэффициента черноты излучающих поверхностей, поглощения промежуточной средой.

Теоретические расчеты проходных характеристик ПСО базируются на уравнении Планка и экспериментальных функциях изменений спектральной чувствительности фотоприемника. Для двух спектральных интервалов $\lambda_1 - \lambda_2$ и $\lambda_3 - \lambda_4$ функций спектральных чувствительностей фотоприемников отношение выходных сигналов пирометра в соответствии с функцией Планка представляется как

$$K = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_1(\lambda, T) S_1(\lambda) r(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \varepsilon_2(\lambda, T) S_2(\lambda) r(\lambda, T) d\lambda}, \quad (1)$$

где $r(\lambda, T)$ – функция Планка; I_1 и I_2 – фототоки, соответствующие разным диапазонам спектральной чувствительности фотодиода; $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ – функции спектральной чувствительности фотоприемника.

Если спектр излучения измеряемого тела отличается от спектра абсолютно черного тела, то измерения при помощи пирометров спектрального отношения также сопряжены с методическими погрешностями, определяемыми разностью спектральных максимумов чувствительности приемников излучения $\lambda_{\max 1}$ и $\lambda_{\max 2}$ и соответственно различием интегральных коэффициентов черноты соответствующим спектральным диапазонам чувствительности ПСО $\varepsilon(\lambda_1 - \lambda_2)$ и $\varepsilon(\lambda_3 - \lambda_4)$ в соответствии с характеристиками металла (рис. 1), что отражено в [2].

В последнее время широко используются ПСО на основе «тандемных диодов», имеющих двухслойную фотодиодную структуру и разность спектральных максимумов порядка $\lambda_{\max 2} - \lambda_{\max 1} = 400-600$ нм. Их участки спектральной чувствительности располагаются рядом с незначительным перекрытием, что дает значительные различия $\varepsilon(\Delta_1)$ и $\varepsilon(\Delta_2)$. При применении мозаичных приемников излучения спектральная селекция может осуществляться за счет параллельного расположения фоточувствительных элементов с разными спектрами чувствительности (светофильтрами) в одной плоскости. Уменьшение методической погрешности в данном случае возможно благодаря сближению спектральных максимумов до 100 нм и уменьшению влияния $\varepsilon(\lambda)$ [3].

В данной работе предлагается уменьшить методическую погрешность измерений температуры посредством реализации ПСО с одним оптическим каналом на одном фотодиоде без применения выделяющих спектральные участки оптических фильтров [4].

Работа одного фотодиода в двух спектральных диапазонах обеспечивается благодаря изменению спектральной чувствительности фотодиодов при переходе от фотодиодного режима работы к фотогальваническому в режиме короткого замыкания. Изменение характеристики спектральной чувствительности кремниевого фотодиода от приложенного напряжения, приведенные в [5], представлены на рис. 2.

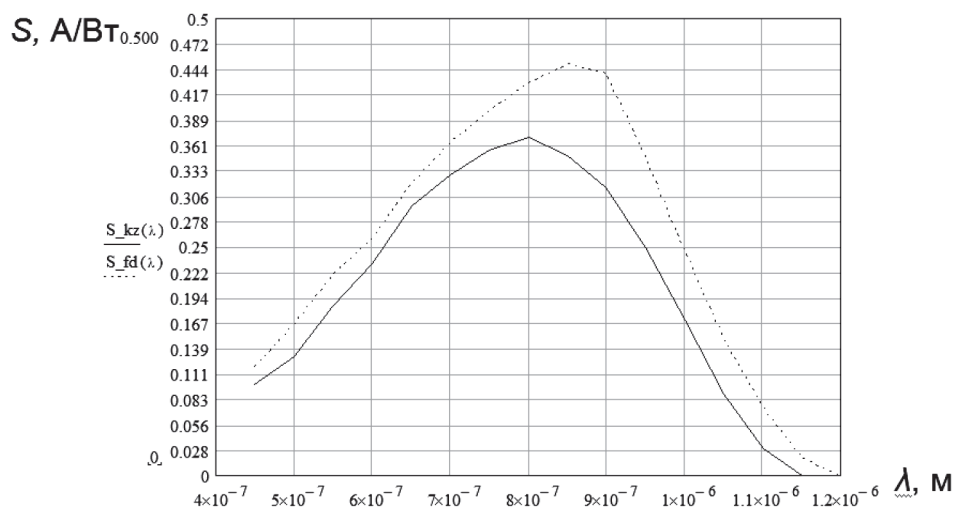


Рис. 2. Изменения спектральной чувствительности кремниевого фотодиода: S_{kz} – при напряжении на фотодиоде $U_{ph} = 0$ В; S_{fd} – при $U_{ph} = 10$ В.

В этой связи предлагается в одном измерении последовательно использовать включение фотодиода с максимально допустимым обратным напряжением и с напряжением, равным нулю (режим КЗ). При этом выходной сигнал пирометра – формировать как отношение выходных сигналов, полученных при разных режимах включения в соответствии с выражением (1).

Относительная инструментальная погрешность пирометра спектрального отношения увеличивается по мере уменьшения крутизны преобразования. Крутизна преобразования определяется частной производной по T отношения пирометрических сигналов $K = I_1/I_2$, а коэффициент погрешности kp при измерении температуры «серых» тел соответственно выражением, приведенным в [3]:

$$kp(T) = \frac{K(T)}{T \left(\frac{d}{dT} K(T) \right)}. \quad (2)$$

Коэффициент погрешности kp показывает, во сколько раз увеличивается погрешность измерений при градуировке пирометра по отношению сигналов. В соответствии с выражениями (1) и (2) на рис. 3 представлена расчетная зависимость коэффициента погрешности kp от температуры АЧТ пирометра спектрального отношения на основе кремниевого фотодиода ФД-256.

Следует отметить, что работа фотоприемника пирометра в широких спектральных участках и близость спектральных максимумов чувствительности кремниевого фотодиода при различных режимах включения, как показывают расчеты, приведенные в [3], уменьшает относительную методиче-

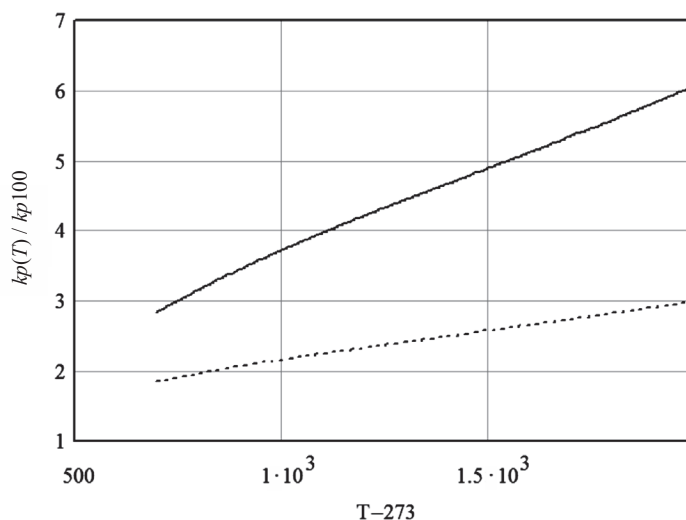


Рис. 3. Расчетная функция зависимости коэффициента погрешности kp от температуры полости АЧТ:

$kp(T)$ – при $U_{pn} = 10$ В, $kp100(T)$ – при $U_{pn} = 100$ В.

скую погрешность измерений данного метода в 1,35–4 раза. При этом инструментальная погрешность сопоставима с пирометрами, использующими оптические узкополосные фильтры или приемники излучения с различными спектральными диапазонами чувствительности, «тандемного» и мозаичного типов.

Список использованных источников

1. Беленький А.М. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: Справочное издание в 3-х томах. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / Под ред. А.М. Беленького, В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 736 с.
2. Фрунзе А.В. Расчетный метод определения температуры спектрального отношения // Измерительная техника. – 2010. – № 6. – С. 39.
3. Сеньков А.Г., Фираго В.А. Оптимизация характеристик пирометров спектрального отношения // Вестн. БГУ. – Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 47.
4. Патент РФ № 2485458, МКИ G 01 J 05/60. Пирометр спектрального отношения / В.А. Захаренко, Д.Г. Лобов, Д.Б. Пономарев, А.Г. Шкаев, заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет». № 2011149297/28; заявл. 02.12.2011; опубл. 20.06.2013 г, Бюл. № 17. – 4 с.: ил.
5. Ишанин Г.Г. Источники и приемники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Ишанин Г.Г. [и др.]. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.